HAL
open science

Planification réactive des opérations de maintien et d'actualisation réglementaire et technologique des systèmes complexes

Yann Le Quéré, Marc Sevaux, Damien Trentesaux, Christian Tahon

To cite this version:

Yann Le Quéré, Marc Sevaux, Damien Trentesaux, Christian Tahon. Planification réactive des opérations de maintien et d'actualisation réglementaire et technologique des systèmes complexes. International Conference on Computer aided Maintenance, 2001, Rabat, Maroc. hal-03127257

HAL Id: hal-03127257

https://uphf.hal.science/hal-03127257v1

Submitted on 1 Feb 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Planification réactive des opérations de maintien et d'actualisation réglementaire et technologique des systèmes complexes

Ce travail est supporté par la SNCF.

LE QUERE yann (a,b), SEVAUX Marc (a), TRENTESAUX Damien (a), TAHON Christian (a).

(a) Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis
CNRS, UMR 8530 – LAMIH/SP
59313 Valenciennes cedex 9
Téléphone : +33(0)3 27 51 13 54
Mail : Yann.Lequere@univ-valenciennes.fr

(b) EIMM d'Hellemmes-SNCF
57 rue Ferdinand Mathias
59230 Lille-Hellemmes
Téléphone : +33(0)3 28 55 81 55

Mots clefs : Planification, réactivité, robustesse, maintenance, système complexe.

Résumé : Cet article propose l'étude de cas de la planification de la maintenance d'un système complexe. La problématique de la planification dans un contexte ou les tâches sont sujettes à aléas et où les modifications du plan sont à minimiser compte tenu de la faible mobilité des produits traités est traitée.

I-Introduction

La maintenance d'un système complexe (bateau, avion, train…) est soumise à des contraintes propres au système ou propre à l'activité de maintenance. Lors de la vie de tels systèmes, le produit passe par plusieurs phases de maintenance (du simple nettoyage au démontage complet). Le but de ces opérations est de garantir un bon état technique et sécuritaire du produit pendant toute la durée de vie pour laquelle il a été conçu. Ces produits ont un coût d'immobilisation élevé. Leur nombre est limité et en cas d'immobilisation ils ne sont pas remplacé auprès de leur utilisateur. Ils sont constitués de nombreuses pièces, elles-mêmes très complexes. De ce fait, le nombre de tâches à effectuer est très grand et la nature très variée de celle-ci impose la gestion de nombreux corps de métier aux contraintes diverses sur un même produit.

Par ailleurs, la durée des tâches ne peut être calculée exactement pour chaque produit. Par exemple, pour un même type de moteur à réaction, chaque moteur vieillit différemment selon son utilisation. En effet, un moteur exposé au sable dans les régions désertiques se dégrade plus vite qu'un moteur fonctionnant dans des régions sans sable.

Dans une première partie, nous éclaircirons les problématiques de planification et de réactivité dans le contexte de la maintenance des systèmes complexes. Dans la deuxième partie, nous mettrons en évidence que les travaux dans ce domaine ne répondent pas complètement aux problématiques soulevées. Par conséquent,

Nous proposerons, dans la troisième partie, une contribution permettant de lier la planification et la réactivité. Ensuite, nous décrirons le cas industriel de la maintenance des TGV à la S.N.C.F., en présentant l'organisation de la maintenance, la gestion des engins et des tâches que l'on doit réaliser. Par la suite, nous établirons un modèle simplifié du cas présenté. Ce modèle sera simulé afin de valider nos propositions. Enfin, nous conclurons sur l'analyse des résultats, et sur la possibilité de faire évoluer la méthode pour répondre entièrement au problème posé.

II- La maintenance des systèmes complexes

a) Défintions

Le concept de *planification*, dans tout cet exposé, est considéré d'une manière générale. Il représente la gestion des approvisionnements, l'affectation aux ressources, le séquencement et l'ordonnancement des tâches [Eesquirol, Lopez, 99].

On utilisera le terme de *réactivité* pour caractériser l'aptitude d'un système de planification à réagir aux spécificités du produit. La réactivité est caractérisé par le délai de réaction du système :

Le délai de retour à une situation normale (planifiée, calculée) après perturbation est égal au temps de détection de la perturbation + temps de montée d'information + temps de traitement + temps de descente d'information + temps de mise en place de la modification [Regnier, Vallespir, 99].

b) Problématique

Dans le contexte de la maintenance d'un système complexe, la *planification* est nécessaire pour gérer l'arrivée en temps et en heure des pièces de rechange (on peut citer par exemple le cas du changement d'hélice de bateau) . On doit donc prévoir la réparation de ces pièces avant l'immobilisation du produit. La gestion des ressources nécessite également une planification rigoureuse, celles-ci sont généralement très spécifiques au type de produit réparé, en nombre limité, et assez peu flexibles. La circulation et les emplacements des produits doivent également être planifiés précisément compte tenu de la mobilité réduite et de l'encombrement de tels produits. La diversité des tâches et des corps de métier liés autour du même produit impose également un effort dans le séquencement et l'ordonnancement des tâches.

Cependant tous les efforts de planification ne peuvent répondre aux spécificités de la maintenance. L'état des produits est variable selon l'utilisation du client donc le nombre et la durée des tâches pour chaque produit ne peuvent être considérés comme certains. On doit alors s'intéresser à la capacité d'adaptation des ressources.

En effet, l'estimation de la durée d'une tâche ne peut que se faire pour une petite série de produit (par exemple une flotte 150 avions) par une étude statistique sur l'ensemble des produits de la série. D'une part, cet ensemble est réduit et peu significatif. D'autre part, la durée exacte de cette tâche reste assujettie au vieillissement spécifique du produit. C'est pourquoi, l'ensemble des tâches à effectuer ne peut être considéré comme complètement déterminé dans leur durée, leur nombre ou leur nature, pour un certain niveau de maintenance et pour un produit donnée.

Dans un contexte de maintenance de système complexe, où la mobilité et l'encombrement des produits traités jouent un rôle considérable, il devient nécessaire d'anticiper toutes modifications qu'un plan de travail peut subir sous peine de perdre tout le gain de la modification par le temps

de mise en place de celle-ci. L'adaptation des ressources et l'anticipation des modifications possibles se prend en compte dès la conception du plan par la robustesse a priori d'un plan de travail. Nous reprendrons la définition du groupe Flexibilité du GOThA[1] et appellerons robustesse a priori d'un plan de travail, la garantie de maintien de la performance du plan par rapport à des modifications de dates, d'ordre ou d'affectation des tâches. On peut rajouter les modifications de gamme pour l'apparition de nouvelles tâches.

III-Etat de l'art

On distinguera plusieurs approches : Les approches temps réel où l'ordonnancement des tâches est réalisé par règle de priorité dont la sélection est choisie en tenant compte des enjeux de planification, les approches intégrées où la planification et la réactivité ont un poids égal dans la construction de l'ordonnancement et enfin les approches robustes où la réactivité est considérée implicitement par la notion de robustesse a priori, c'est à dire dès la conception de l'ordonnancement.

Parmi les approches dites temps réel, [Boucon, 91] propose d'utiliser des règles de priorité cohérentes par rapport aux objectifs de l'ordonnancement (Cmax, tardiness, Lateness…). Cette approche ne permet pas toutefois d'assurer la cohérence des règles et des objectifs d'ordonnancement en cas d'aléas. C'est pourquoi [Mebarki, 95] propose une sélection dynamique des ces règles. Cette méthode est réactive, mais elle s'applique à des cas où le produit considéré est très mobile, où les temps de transfert ou de permutation des tâches sont négligeables. Ce type de méthode convient d'avantage à des petites pièces de grandes séries.

L'intégration des concepts de planification et de réactivité offre une alternative intéressante au « tout réactif », le logiciel ORDO [Roubellat et al., 95] se base sur le principe de groupes d'opérations permutables. Il s'agit de construire un ordonnancement dans lequel les opérations pouvant permuter sont réunies dans une macro-tâche sans en fixer de séquence précise. S'il n'y a pas de perturbation en ligne, on choisit la séquence optimale, dans le cas contraire une autre séquence compatible est réalisée. Cet algorithme utilise la flexibilité des ateliers pour passer d'un plan à un plan de la même famille. Cependant dans le cas de la maintenance d'un système complexe, les ressources sont en nombre limité et très peu flexibles, pour ce problème la méthode perd alors son intérêt.

L'algorithme Cut/Set de [Demeulmeester, Herroelen, 92] fonctionne sur la comparaison entre un ordonnancement statique (et ses proches voisins) et l'ordonnancement partiel en cours de réalisation. Cette méthode ne peut fonctionner avec un grand nombre de données compte tenu de l'explosion combinatoire.

Un autre type d'approche consiste à considérer la réactivité implicitement par l'étude de la robustesse d'un plan au stade de sa conception. [Kouvelis, Yu, 97] proposent un algorithme pour le choix d'un ordonnancement en fonction de différents scenarii. L'ordonnancement choisi est celui qui minimise le maximum de déviation pour tous les scenarii possibles. l'exhaustivité des scenarii, nécessaire pour cette méthode, est impossible dans le cas de la maintenance des systèmes complexes.

[1] Groupe d'Ordonnancement Théorique et Appliqué

IV-Contribution

Notre approche consiste à élaborer un ordonnancement robuste par distribution des marges libres du plan de travail. Nous considérerons la robustesse comme une garantie de performance, et également comme la minimisation du nombre de modifications apportées au plan de travail à la suite d'un aléa. La marge libre d'une tâche apparaît entre la date de fin de cette tâche et la date de début de la prochaine tâche sur le même produit (fig.1 : apparition d'une marge libre entre la tâche 1 du produit 2 sur la ressource 2 et la tâche 2 du produit 2 sur la ressource 5) ou entre la date de fin de cette tâche et la date de début d'une autre tâche sur la même ressource (fig.1 : apparition d'une mare libre entre la tâche 3 et la tâche 4 du produit 1 sur la ressource 1).

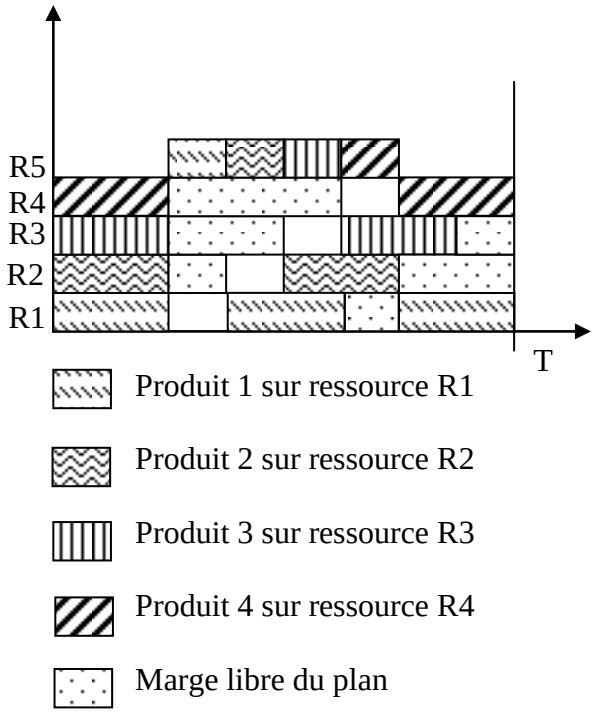

Fig.1 : Marge libre d'un plan avec ressource goulet

Certains plans de travaux bénéficient d'une quantité plus grande de marge libre que d'autres du fait de la combinaison entre les contraintes liées aux produits et les contraintes liées aux ressources. C'est le cas lorsque l'on compare un ordonnancement au plus tôt(fig.2) et un ordonnancement au plus tard (fig.3).

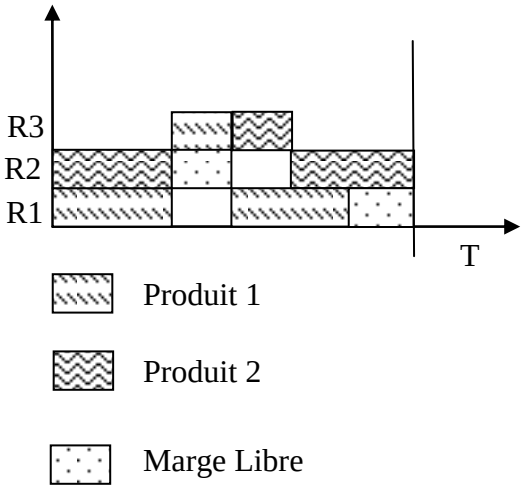

Fig.2 : Marge libre d'un plan avec ressource goulet R3 : Ordonnancement au plus tôt

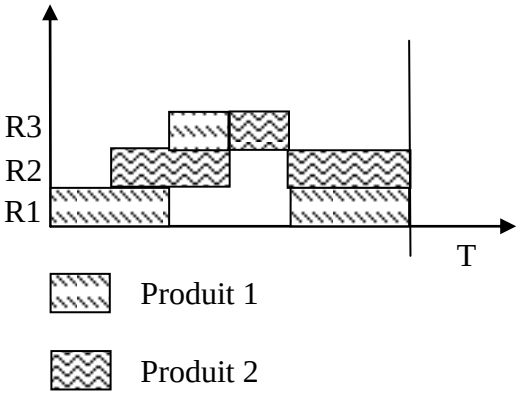

Fig.3 : Absence de marge libre d'un plan avec ressource goulet R3 : Ordonnancement au plus tard

La première étape de la méthode consiste ainsi à élaborer un plan de travail au plus tôt afin de disposer de la quantité

maximale de marge libre disponible dans le plan de travail. La seconde étape consiste à propager la marge libre disponible sur les dernières tâches de la gamme d'un produit aux tâches précédentes de ce produit et aux tâches d'autres produits qui partagent les mêmes ressources. En fait, la propagation de la marge libre est effectuée par relâchement des contraintes des tâches d'un même produit ou des tâche réalisées sur une même ressource. La distribution de la marge libre est effectuée de manière à maximiser le nombre de tâche disposant d'une marge libre.

V-Présentation du cas industriel

a) Le produit.

Le produit à maintenir est un TGV dont la durée de vie est approximativement de trente années. Pour cela, nous effectuons une maintenance à plusieurs niveaux de consistance en fonction du kilométrage de la rame. Le problème de la maintenance est de réparer une rame juste avant qu'elle ne tombe en panne dans un délai très court, en effet l'immobilisation d'un tel produit est coûteuse puisqu'il n'y a pas de remplacement de rame pendant les périodes de pointes, donc on doit immobiliser un nombre fixé de rame en même temps selon la demande de disponibilité des rames pour satisfaire les besoins des utilisateurs.

Les TGV sont constitués de *pièces consommables* (pièce usée = pièce jeté, pièce neuve = pièce achetée), de *pièces réparables* (PRM), et de *pièces réparables avec dotation* (la dotation signifie que le constructeur a fourni des pièces de rechange, par exemple un transformateur). Ces pièces réunissent des métiers divers (pièces mécano-soudée, électronique et informatique embarquée, menuiserie, climatisation…)

Un établissement, dit directeur de rame, gère un type de rame particulier et met les rames à disposition du client. Il émet les règles de maintenance (consistance et périodicité de travaux) et effectue les travaux ou les fait effectuer auprès d'établissements fournisseurs.

b) Les tâches

La détermination de la durée des tâches est réalisée sur la base du retour d'expérience des agents du terrain pour des tâches comparables sur du matériel différent ou sur les informations émises par des établissements ayant précédemment effectué ces tâches. On dispose d'une gamme opératoire pour chaque type de rame TGV et pour chaque niveau de maintenance. Celle ci n'est pas nécessairement figée. La mission de sécurité reste prioritaire et peut générer de nouvelle tâches à accomplir.

On doit effectuer et gérer des tâches aux métiers variés, sur produit ou sur pièces constitutives, de maintenance (entretien et réparation) ou d'amélioration (technologique ou sécuritaires). Certains problèmes de compatibilité des tâches doivent être pris en compte au niveau des contraintes de planification. Enfin, les ressources disponibles sont en nombre limités les outillages (vérins, pont roulant…), les emplacements spécifiques à certaines tâches (cabine de peinture, grenaillage…) et les ressources humaines pour certains corps de métier aux qualificationx spécifiques (soudeurs, tôliers…).

Le plan de travail doit prendre en compte l'ensemble de ces contraintes pour tous les produits pour tous les corps de métier.

c) L'organisation et les ressources.

La première décomposition est une décomposition produit (organe de roulement, caisse et structure, aménagements intérieurs, motrice). Ensuite pour chacune des ces unités le décomposition est spécifique. L'unité organe de roulement se décompose en unité produits (essieux, châssis bogies, anneaux). L'unité structure et caisse suit une décomposition métier (tôlier, soudeur,

chaudronniers, peintre). L'unité aménagement intérieur suit une structure métier puis produit (aménagements intérieurs sur des produits spécifiques, électriciens, thermiciens). L'unité motrice se décompose en unités produits (transformateurs, câblage motrice, blocs moteur, freins, groupes tournants, DBTF).
L'emplacement des ateliers : un premier passage obligatoire dans le bâtiment de découplage de la rame, puis les trois produits principaux sont orientés vers les unités concernées. Les emplacements sont limités, du principalement à la place que prennent les produits. Le déplacement de ceux ci demande de gros moyens (locotracteurs, pont roulant ou transbordeur).

V-Modèle de simulation

Nous avons choisi un modèle comportant un ensemble de dix tâches pour deux remorques de TGV, soit vingt tâches à réaliser sur trois ressources. Deux ressources sont orientés produit (une pour chaque remorque), la dernière est dédiée aux travaux de tôleries pour les deux remorques.

Le modèle a été simulé par un programme développé sur la plate-forme Delphi 6 de Borland. L'ordonnancement optimum a été calculé par énumération de l'ensemble des possibilités. Nous avons ensuite élaborer à partir de l'optimum un ordonnancement robuste en distribuant les marges libres. Enfin, le programme a généré aléatoirement l'allongement de certaines tâches (entre 10% et 50% de la durée des tâches) pour un nombre d'aléas choisi et une durée maximale de ceux-ci.

VI-Tests et résultats

Pour un nombre d'aléas égal à deux et une durée maximale de ceux ci allant de deux à quatre unité de temps nous avons pu comparer les résultats respectifs de l'ordonnancement optimum et de l'ordonnancement robuste. Nous pouvons voir sur la figure 4 que le nombre de tâches affectées par l'aléa, c'est à dire le nombre de modifications que l'on devra apporter au plan est supérieur pour l'ordonnancement optimum dans le cas de deux aléas d'une durée maximale égale à deux. Sur les figures 5 et 6, les graphique permettent de voir qu'en moyenne les deux ordonnancements subissent le même nombre de modifications, c'est à dire une moyenne de 5,4 pour les deux ordonnancements sur la figure 5 et une moyenne de 8,5 pour l'ordonnancement robuste et de 9 pour l'ordonnancement optimum sur la figure 6. Donc, pour des durées maximales d'aléa supérieures ou égales à trois la différence n'est plus significative.

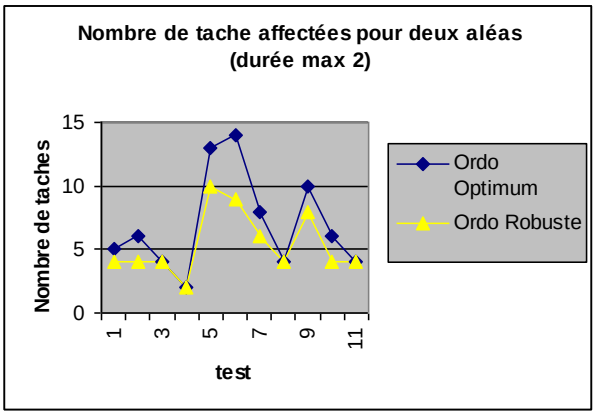

Fig.4 : Nombre de tâches subissant l'impact des aléas

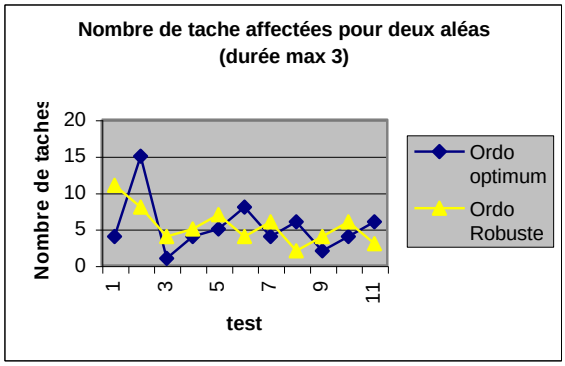

Fig.5 : Nombre de tâches subissant l'impact des aléas

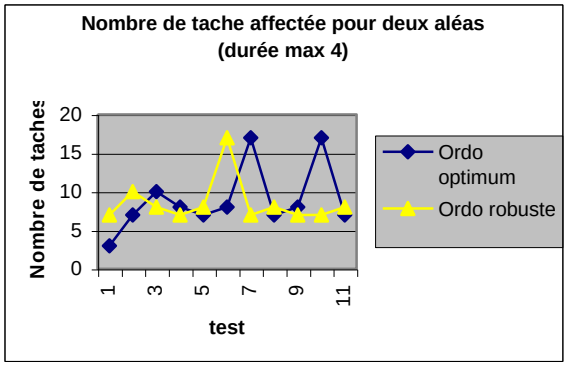

Fig.6 : Nombre de tâches subissant l'impact des aléas

La date de fin de la dernière tâche (Cmax) est semblable lorsque l'on réalise la simulation de la figure 7 avec une durée maximale de deux unités de temps et très proches pour des durées de 3 et 4 unités de temps pour les figures 8 et 9. Les écarts de performance ne sont pas réellement significatifs par rapport à la durée maximale des aléas introduits.

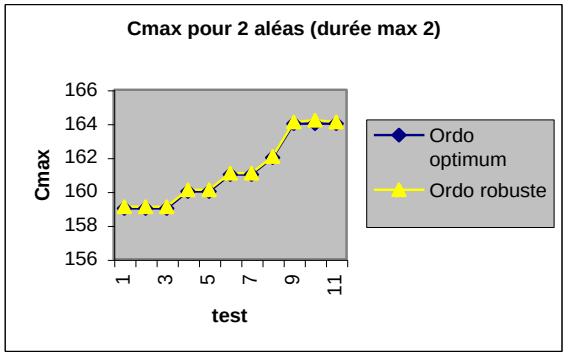

Fig.7 : Cmax avec deux aléas

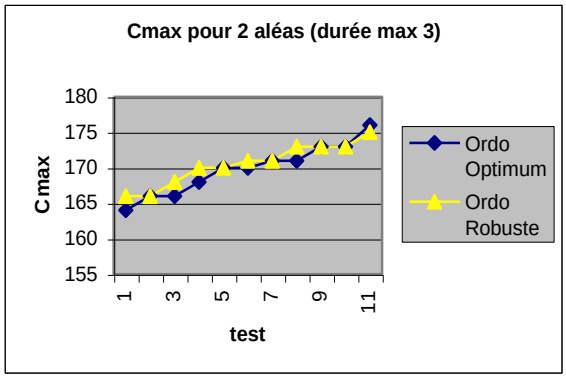

Fig.8 : Cmax avec deux aléas

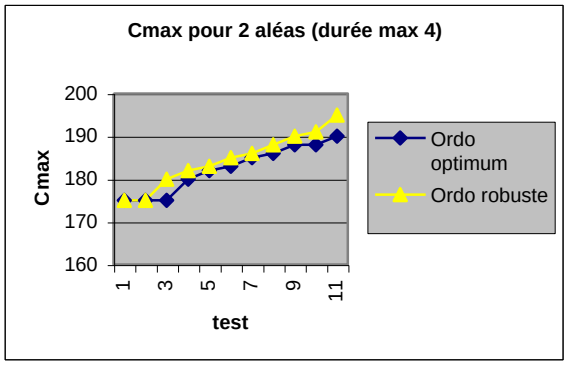

Fig.9 : Cmax avec deux aléas

VII-Conclusions et perspectives

Nous avons introduit la réactivité de manière implicite au niveau de la conception des ordonnancements à travers la robustesse des ordonnancements. La robustesse telle que nous la concevons s'applique à tout type d'aléa d'une durée inférieure à une limite précise. Dans notre cas cette limite est une durée maximale d'aléa de deux unités de temps. Nous avons montré la réduction du nombre de modification à apporter au plan dans la mesure de cette limite. La suite de notre travail consistera à enrichir le modèle avec plus de tâches et plus de ressources pour voir apparaître d'avantage de marge libre et à augmenter le nombre de tests réalisés afin de disposer d'ensembles de données encore plus significatifs.

Enfin, l'élargissement de cette méthode aux concepts de pilotage de processus par l'intermédiaire des temps de transfert d'information permettra une intégration plus forte de la réactivité dans la méthode.

Bibliographie

[Boucon 91] :Boucon D ., Ordonnancement d'ateliers : aide au choix de règles de priorité, thèse de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 1991.

[Demeulmeester, Herroelen 92] : Demeulmeester E., Herroelen W. « a branch and bound procedure for the multiple ressopurce-constrained project scheduling problem », *Management science,* vol. 38, n° 12, p. 1803-1818, 1992.

[Esquirol, Lopez 99] : Esquirol P., Lopez P., L'ordonnancement, Edition Economica, 1999.

[Kouvelis, Yu 97] : Kouvelis D., Yu G., Robust discrete optimization and its applications, Kluwer academic Publications, 1997.

[Mebarki 95] : Mebarki N., Une approche d'ordonnancement temps réel basée sur la sélection dynamique de règles de priorité, Thèse de l'université de Lyon, 1995.

[Régnier, Vallespir 99] : Régnier P., Vallespir B. Conduite réactive des systèmes de production : intération des régimes périodiques et événementiel. *Actes du 3e congrès international de génie industriel.* Montréal,Québec, p.1965-1974, mai 1999.

[Roubellat 95] : Roubellat F., Billaut J.-C., Villaumie M., « Ordonnancement d'atelier en temps réel : d'Orabaid à Ordo. », *Revue d'automatique et de productique appliquées,* vol. 8, n°5, p.683-713, 1995.